

Prédiction des émissions des NO_x thermiques à la sortie des chambres de combustion des turbines à gaz

J. TSOGO^a

a. Collège de la garde côtière du Canada, C.P.: 4500, Sydney, NS, B1L 6P1, Canada

Résumé :

Partant d'une banque de données expérimentales, il est développé ici une corrélation permettant de prédire les émissions des NO_x à la sortie des chambres de combustion des turbines à gaz. La corrélation repose sur le temps de résidence calculé à partir du volume de la zone primaire de la chambre de combustion, du débit massique et de la densité de l'air d'entrée. Le taux de réaction est de la forme d'Arrhenius. Les différents paramètres utilisés dans la corrélation sont évalués à partir des conditions opérationnelles. Il est fait usage de 19 types de carburants variant d'un mélange paraffinique à un composé aromatique pur, et brûlés à haute pression (0.2 à 0.9 MPa) dans plusieurs chambres de combustion pour un totale de 861 points de mesure. Les carburants sont caractérisés par leur pouvoir calorifique et leur teneur en hydrogène. Compte tenu de la variété des carburants, de celle des chambres de combustion, de celle des conditions opérationnelles sans oublier l'imprécision inhérente aux mesures expérimentales des émissions de NO_x, la précision de la corrélation qui se situe entre 8 et 51 % pour les différentes chambres concernées par l'étude est jugée satisfaisante.

Abstract:

From a bank of experimental data, a correlation is here developed allowing to predict NO_x emissions in gas-turbine combustors exhaust. The correlation rests on the residence time calculated from the volume of the primary zone of the combustion chamber, the mass flow and the density of entrance air. The rate of reaction is of Arrhenius type. The various parameters used in the correlation are estimated from the operational conditions. 19 types of fuels are used, varying from a paraffinic mixture to a pure aromatic compound, burned at high-pressure (0.2 to 0.9 MPa) in several combustion chambers for a total of 862 points of measure. Fuels are characterized by their calorific value and their content in hydrogen. Considering the variety of fuels, the number of combustion chambers, the variety of operational conditions without forgetting the lack of precision inherent to the experimental measures of NO_x emissions, the precision of the correlation which is situated between 8 and 51 % for the various chambers concerned by the study is considered as satisfactory.

Mots clés: Turbine à gaz; chambre de combustion; émissions; oxydes d'azotes.

1 Nomenclature

a	Taux de formation	P	Pression d'entrée de la chambre de combustion- MPa
b	Constante	P_a	Pression atmosphérique- Mpa
A	Constante pré exponentielle	R	Constante universelle des gaz parfaits- kJ/kg-mol.K
E_f	Energie d'activation pour la formation des NOx	T_f	Température de la zone de formation- K
EI_{NO_x}	Indice d'émission de NOx- g/kg	τ	Temps de résidence dans la zone de formation- s
e	Fonction exponentielle	V_f	Volume de la zone primaire- m^3
Φ_g	Rapport d'équivalence global		
Ma	Nombre de Mach		

2 Introduction

La prédiction des émissions des NOx à la sortie des chambres de combustion des turboréacteurs est un champ d'intérêt d'importance pour les constructeurs et les opérateurs, compte tenu des exigences de plus en plus contraignantes en ce qui concerne la protection de l'environnement. Cependant, prédire les émissions des NOx reste une tâche très compliquée pour l'ingénieur. La généralisation des recettes pose ici un sérieux problème d'un foyer de combustion à l'autre, du fait du couplage des phénomènes chimiques, thermo et aérodynamiques ayant cours dans les chambres de combustion. Les paramètres contrôlant la formation des NOx dans les chambres de combustion sont nombreux et pas totalement compris. Il est cependant généralement accepté que les paramètres déterminants sont relatifs à la nature du carburant, au rapport d'équivalence, à la pression d'entrée de la chambre et à la température de la zone de formation. Partant d'une banque de données expérimentales constituée à partir de la combustion de 19 carburants dans plusieurs chambres de combustion à différentes conditions opérationnelles, une corrélation semi empirique est développée ici avec succès. Un accent particulier a été mis sur le développement d'une corrélation sur la base de paramètres de performance usuels des moteurs. La corrélation repose sur une base analytique complétée d'éléments empiriques dans le but de combler le manque de compréhension totale des phénomènes ayant cours dans les chambres de combustion. La corrélation développée donne des résultats ayant une déviation standard variant entre 8 et 51% selon les chambres, et se situant autour de 48% lorsqu'on considère l'ensemble des chambres. Pour obtenir ces pourcentages, on calcule dans un premier temps une erreur normalisée en divisant la différence entre la valeur de mesure et la valeur prédite par la valeur de mesure. La déviation standard est ensuite calculée à partir des erreurs normalisées. Les températures et les pressions d'entrée des chambres varient de 315 à 600 K et de 0.2 à 0.9 MPa.

3 Formation de NOx dans la chambre de combustion

La chambre de combustion est comprise comme un réacteur constitué d'une zone de formation des NOx (zone primaire), d'une zone secondaire et d'une zone de dilution. La formation des NOx étant essentiellement un phénomène se déroulant à haute température, l'analyse se limitera à la zone primaire qui est la zone de combustion et de formation des NOx par excellence. On suppose ainsi que la quantité de NOx formée dans la zone primaire se retrouvera en totalité à la sortie de la chambre de combustion sans autre forme de transformation.

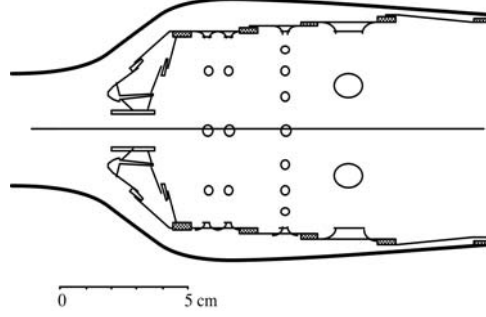


FIG. 1 - Schéma d'une chambre de combustion

4 Modélisation mathématique

Il est possible en s'inspirant de [1] de traduire la formation des NOx dans la chambre de combustion par une formulation simple telle que :

$$\frac{dEI_{NO_x}}{dt} = a \quad (1)$$

a désignant le taux de formation des NOx sous la forme d'une équation d'Arrhenius telle que :

$$a = AP^\alpha e^{\left(-\frac{E_f}{RT_f}\right)} \quad (2)$$

La solution de l'équation différentielle (1) est :

$$EI_{NO_x} = AP^\alpha e^{\left(-\frac{E_f}{RT_f}\right)} \times \tau + b \quad (3)$$

La constante b est égale à zéro, du fait qu'à $\tau = 0$, l'indice d'émission des NOx est nul.

A partir de cette base analytique, la constante pré exponentielle A a été évaluée empiriquement à travers l'introduction du nombre de Mach, du volume de la zone primaire et du rapport d'équivalence global en s'inspirant de [2] et [3]. Le paramètre P (pression) a été normalisé. Le temps de résidence est calculé comme le produit du volume de la zone primaire et de la densité de l'air d'entrée divisé par son débit massique. La meilleure formulation de prédiction de l'indice d'émission des NOx ainsi obtenue est la suivante :

$$EI_{NO_x} = 23.22 \times 10^{16} \times V_f^{-0.18} \times \Phi_g^{0.26} Ma^{0.6} \left(\frac{P}{P_a}\right)^{-0.75} e^{\left(-\frac{75000}{T_f}\right)} \times \tau \quad (4)$$

La relation ci-dessus a été utilisée pour calculer les émissions de NOx de différentes chambres de combustion exploitées à diverses conditions opérationnelles avec les résultats qui suivent.

5 Résultats et validation

Sur la figure ci-dessous, on représente la comparaison des valeurs calculées et mesurées des émissions des NOx à diverses conditions opérationnelles pour la chambre '1/3 ARL'. La population est de 221 points et la déviation standard de 48%. Cette précision est acceptable compte tenu des faibles valeurs de l'indice d'émission des NOx.

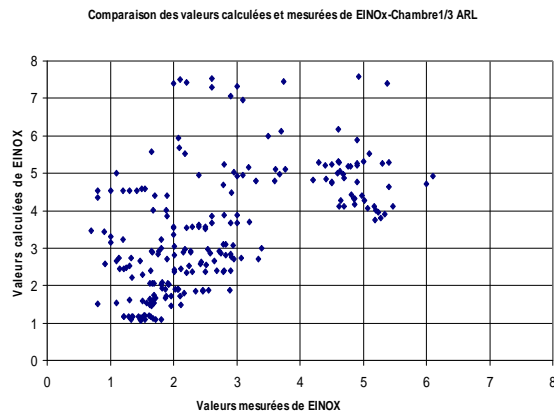


FIG. 2 - Comparaison des valeurs calculées et mesurées de EI_{NO_x} - Chambre 1/3 ARL

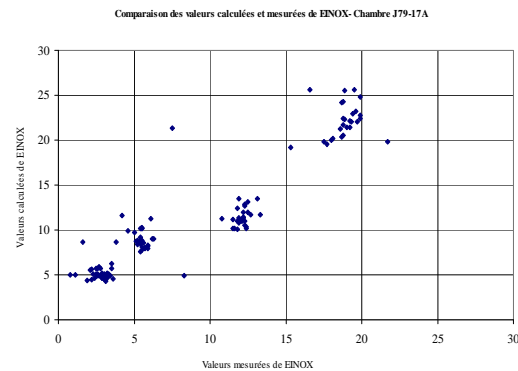


FIG. 4 - Comparaison des valeurs calculées et mesurées de EI_{NO_x} - Chambre J79-17A

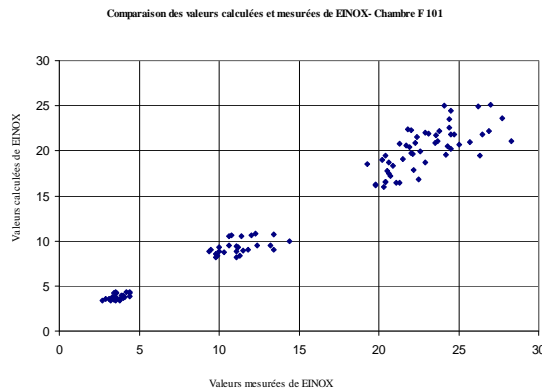


FIG. 3 - Comparaison des valeurs calculées et mesurées de EI_{NO_x} - Chambre F101

Sur la figure ci-dessus, on représente la comparaison des valeurs calculées et mesurées des émissions des NOx à diverses conditions opérationnelles pour la chambre 'F101'. La population est de 104 points et la déviation standard de 8%. Cette précision est très respectable.

Sur la figure suivante, on représente la comparaison des valeurs calculées et mesurées des émissions des NOx à diverses conditions opérationnelles pour la chambre 'J79-17A'. La population est de 125 points et la déviation standard de 51%. Cette précision est respectable, compte tenu des erreurs inhérentes à la mesure de EI_{NO_x} .

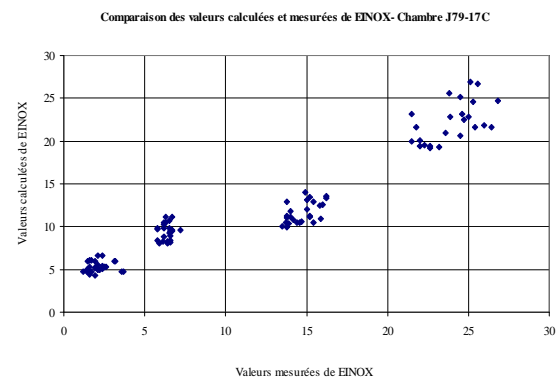


FIG. 5 - Comparaison des valeurs calculées et mesurées de EI_{NO_x} - Chambre J79-17C

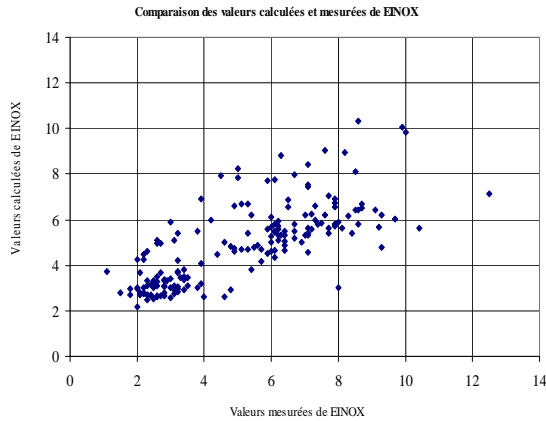


FIG. 6 - Comparaison des valeurs calculées et mesurées de EI_{NO_x} - Chambre PW

Sur la figure ci-dessus, on représente la comparaison des valeurs calculées et mesurées des émissions des NOx à diverses conditions opérationnelles pour la chambre 'PW'. La population est de 191 points et la déviation standard de 29%. Cette précision est très respectable.

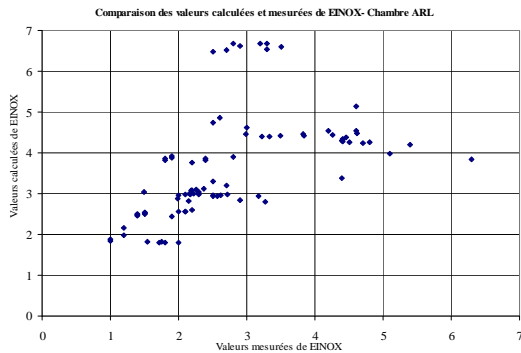


FIG. 7 - Comparaison des valeurs calculées et mesurées de EI_{NO_x} - Chambre ARL

Sur la figure ci-dessus, on représente la comparaison des valeurs calculées et mesurées des émissions des NOx à diverses conditions opérationnelles pour la chambre 'PW'. La population est de 85 points et la déviation standard de 34%. Cette précision est respectable, compte tenu des faibles valeurs des indices d'émission des NOx.

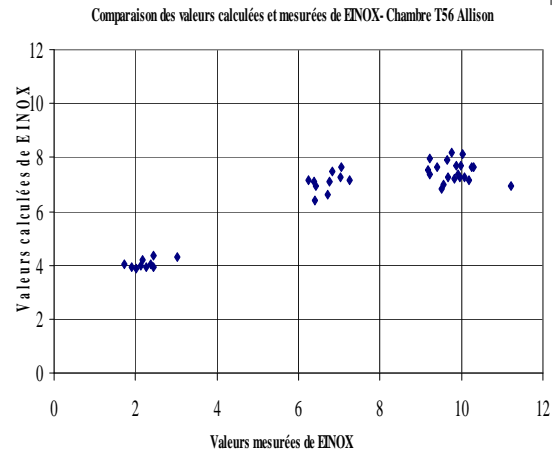


FIG. 8 - Comparaison des valeurs calculées et mesurées de EI_{NO_x} - Chambre T56 Allison

Sur la figure ci-dessus, on représente la comparaison des valeurs calculées et mesurées des émissions des NOx à diverses conditions opérationnelles pour la chambre 'PW'. La population est de 33 points et la déviation standard de 45%. Cette précision est très respectable, compte tenu de la faible population et des faibles valeurs des indices d'émission des NOx.

Comparaison des valeurs calculées et mesurées de EINOX- Ensemble des chambres

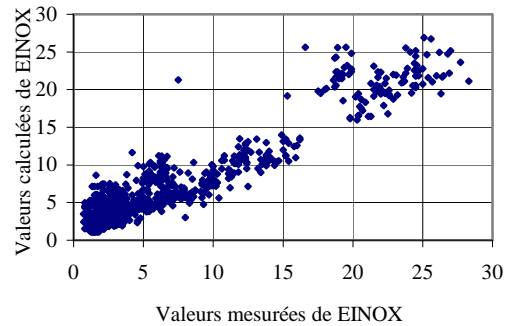


FIG. 9 - Comparaison des valeurs calculées et mesurées de EI_{NO_x} - Ensemble des chambres

Sur la figure ci-dessus, on représente la comparaison des valeurs calculées et mesurées des émissions des NOx à diverses conditions opérationnelles pour l'ensemble

des chambres. La population est de 861 points et la déviation standard de 48%. Cette précision est très respectable compte tenu du nombre de chambres (7 au total), de la

disparité des conditions opérationnelles, sans oublier l'imprécision inhérente à la mesure des polluants.

6 Conclusion

Dans cette étude, il est présenté une corrélation simple mais pratique du phénomène de formation des NOx dans les chambres de combustion des turbines à gaz. La corrélation est représentative d'une population de 861 points de mesure et de 7 chambres de combustion différentes dont elle décrit les résultats expérimentaux avec une précision respectable de 48%. La corrélation qui repose sur une base analytique exploite des paramètres opérationnels faciles d'accès (pression et température d'entrée de la chambre), cette dernière étant prise en compte dans le calcul de la température de formation. Il est par ailleurs tenu compte de la géométrie de la chambre à travers son volume et le calcul du temps de résidence, de même que du rapport d'équivalence global de la chambre. Le modèle d'Arrhenius ne peut sûrement pas expliquer tous les phénomènes ayant cours dans la chambre de combustion, mais compte tenu de la complexité de ces derniers il n'est pas évident qu'un modèle plus sophistiqué fasse mieux. Le fait que la corrélation soit applicable à différentes chambres de combustion laisse penser que son applicabilité est extensible à des chambres autres que celles concernées par la présente étude.

N.B : Les chambres de combustion concernées par cette étude sont répertoriées et décrites dans [3], [4] et [5]. Les données expérimentales des chambres 1/3 ARL, ARL et T56 Allison proviennent de [3]. Les données expérimentales des chambres J79-17A, J79-17C et F101 proviennent de [4] et [5]. Les données expérimentales de la chambre PW proviennent de [6].

Références

- [1] Najjar Y., & Droubi R., Soot Formation in Gas Turbine Combustors, Fuel Science & Technology Int'l, 5 (4), 373-387, 1987.
- [2] De Champlain A., Kretschmer D., Tsogo, J., & Pearce G., Prediction of Soot Emissions in Gas-Turbine Combustors, Journal of Propulsion and Power, Vol. 13, No. 1, 117-122, 1997.
- [3] Pearce G., Kretschmer D, Odgers J & Wang., The Prediction of Thermal NOx in Gas Turbine Exhausts, 11th International Symposium on Airbreathing Engines, Tokyo, 1993.
- [4] Gleason C., & Martone J., Fuel Character Effects on J79 and F101 Engine Combustor Emissions, ASME Paper 80-GT-70, New Orleans, 1980.
- [5] Gleason C., Oller T., Shayerson M., & Bahr D., General Electric Co. Cincinnati, Report No. AFAPL-TR-80-2015, April 1978, Report No. AFWAL-TR-80-2018, June 1979 & Report No. AFWALTR-80-2092.
- [6] Gratton M., & Sampath P., Pratt & Withney Canad Inc., Report No. AFWAL-TR-84-2042 (ESL-TR84-29), July 1984.